

Список использованных источников

1. Елисеев К.В., Зиновьева Т.В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах: учеб. пособие. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 112 с.
2. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. Самара: изд-во гос.техн. ун-та, 2010. – 271 с.
3. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
4. Руководство по эксплуатации горелки ГПС–0,4. Екатеринбург: ОАО «Научно исследовательский институт металлургической теплотехники», 2015. – 12 с.

УДК 536.2; 621.1

Ю. Р. Гильметдинова, Д. Н. Степанов, В. А. Микула

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА КОНВЕКТИВНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ВОЗДУХА

Аннотация

Рассмотрен способ интенсификации теплообмена, при рекуперативном нагреве воздуха до температур порядка 800–1000°С. Проанализировано влияние на процесс теплообмена высоты и толщины продольного ребра, а также их стоимостные показатели. Выбрана конструкция теплообменного элемента для дальнейшей проработки.

Ключевые слова: воздух, рекуперативный нагрев, высокотемпературный воздушнонагреватель, интенсификация теплообмена, гибридная схема ПГУ.

Abstract

The method heat transfer enhancement was considered in regenerative air heating to temperatures of about 800–1000 ° C. Impact the fins height and longitudinal thickness on heat transfer were analyzed, as well as their cost parameters were analyzed. The design of the heat exchanger element has been selected for further development.

Keywords: air, recuperative heating, high-temperature air heater, heat exchange intensification, combined-cycle power unit.

В связи со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, с одной стороны, и с достаточно высокой ценой этих энергоресурсов, с другой, интерес к использованию твердых топлив в энергетике с каждым годом растет все больше. Уже достаточно продолжительное время в мире ведутся исследования по разработке высокоэффективного способа использования угля. Одним из перспективных направлений является развитие ПГУ на твердом топливе, так называемые ПГУ–ВЦГ с внешним сжиганием топлива.

В схеме гибридной ПГУ–ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздушнонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух (до 750–1000°С), направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

Основная проблема высокотемпературных воздушнонагревателей (ВВН) – это конструкционные материалы труб. Они должны быть достаточно термостойкими, но стоимость подобных металлов высока, например, металл марки ХН67ВМТЮ, рассчитанный на дли-

тельную работу при температурах до 950°C, стоит 3 млн. руб./т. Исходя из вышесказанного следует, что при разработке высокотемпературного воздухонагревателя первоочередной задачей является снижение затрат на дорогостоящий металл. Для решения данной проблемы, авторами предлагается конструкция биметаллической трубы с оребрением (рис. 1). Оребрение обеспечивает интенсификацию теплопередачи и способствует удешевлению конструкции. Внутренняя труба конструкции состоит из жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ, а наружная – из углеродистой стали 20 с защитным покрытием, разработанным Уральским институтом металлов. Покрытие позволяет использовать углеродистые стали до ~1050°C.

Для выбора оптимальной конструкции биметаллической трубы необходимо провести технико-экономический расчет. Геометрические характеристики оребрения подбираются таким образом, чтобы удовлетворить двум основным требованиям: высокой эффективности теплопередачи и эксплуатационной надежности при минимальных стоимостных показателях.

Стоимость поверхности ВВН определяется, как сумма стоимости жаропрочной трубы ($C_{ж}$), трубы из углеродистой стали (C_{yc}) и стоимости ребер из той же углеродистой стали (C_p).

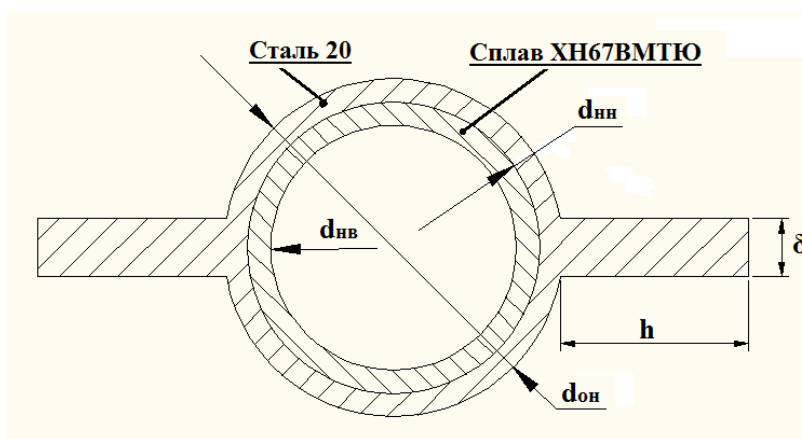


Рис. 1. Конструкция биметаллической трубы с оребрением

$$C = \frac{\pi \cdot (d_{нн}^2 - d_{нв}^2)}{4} \cdot \rho_{ж} \cdot l \cdot C_{ж} + \frac{\pi \cdot (d_{он}^2 - d_{нн}^2)}{4} \cdot \rho_{yc} \cdot l \cdot C_{yc} + h \cdot \delta \cdot l \cdot C_{yc}, \quad (1)$$

где $\rho_{ж}, \rho_{yc}$ – плотности жаропрочного и углеродистого металла, кг/м³; $C_{ж}, C_{yc}$ – стоимости жаропрочного и углеродистого металла, тыс. руб./т; l – длина трубы, м; δ – толщина ребра, м; h – высота ребра, м; $d_{нв}, d_{нн}$ и $d_{он}$ – геометрические размеры, м, согласно рис. 1.

Тепловой поток через цилиндрическую оребренную с внешней стороны стенку, рассчитывают по формуле:

$$Q_{ор} = k_{ор} \cdot (T_{г} - T_{в}) \cdot F_{ор}, \quad (2)$$

где $Q_{ор}$ – тепловой поток, передаваемый через оребренную стенку, Вт; $T_{г}$ и $T_{в}$ – температуры горячей и холодной среды, °C; $k_{ор}$ – коэффициент теплопередачи через оребренную стенку, Вт/(м²·K); F – площадь оребренной поверхности трубы, м².

Для коэффициента теплопередачи через оребренную стенку запишем известную из курса теории тепло- и массообмена [1] формулу:

$$k_{ор} = \left(\frac{d_{он}}{\alpha_{в} d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2 \cdot \lambda_{ж}} \ln \frac{d_{нн}}{d_{нв}} + \frac{d_{он}}{2 \cdot \lambda_{yc}} \ln \frac{d_{он}}{d_{нн}} + \frac{1}{\alpha_{г} \cdot \eta \cdot \varphi} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $\alpha_{в}$ и $\alpha_{г}$ – коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха и газов, Вт/м²·K; $\lambda_{ж}, \lambda_{yc}$ – коэффициенты теплопроводности жаропрочного и углеродистого металла, Вт/м·K; η – коэффициент эффективности оребрения; $\varphi = F_{ор}/F_{глад}$ – коэффициент оребрения; $d_{нв}, d_{нн}$ и $d_{он}$ – геометрические размеры, м, согласно рис. 1.

Коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны определяется следующим образом:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.38}. \quad (4)$$

Используя полученное значение, вычисляем коэффициент теплоотдачи от стенки к цикловому воздуху:

$$\alpha_B = \frac{Nu * \lambda}{d_{он}}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи с газовой стороны определяется как:

$$\alpha_r = \alpha_{глад} * (1 - (1 - \eta) * \frac{F_p}{F_{оп}}), \quad (6)$$

где $\alpha_{глад}$ – коэффициент теплоотдачи с газовой стороны для гладкой трубы [2], Вт/м²·К; F_p – поверхность ребра, м².

Для ребра постоянного поперечного сечения, согласно [3], коэффициент эффективности оребрения определяется по формуле:

$$\eta = \frac{th(mh)}{mh}. \quad (7)$$

Параметр m рассчитывается как:

$$m = \sqrt{\frac{2 * \alpha_r}{\lambda_{yc} * \delta}}. \quad (8)$$

По вышеизложенной методике производится расчет труб с параметрами:

- внутренний диаметр неоребренной трубы – $d_{нв} = 21$ мм;
- наружный диаметр неоребренной трубы – $d_{нн} = 25$ мм;
- наружный диаметр оребренной трубы – $d_{он} = 29$ мм;
- температура горячей среды – $T_r = 1000$ °С, холодной – $T_b = 300$ °С;
- коэффициент теплопроводности жаропрочного металла – $\lambda_{ж} = 15,6$ Вт/м·К, углеродистой стали – $\lambda_{yc} = 43,3$ Вт/м·К;
- стоимость жаропрочного металла $C_{ж} = 3000$ тыс.руб/т, углеродистого метал – $C_{yc} = 50$ тыс. руб/т

Толщина ребра – $\delta = 3, 5$ и 10 мм, длина трубы – $l = 1000$ мм, высота ребра – h , варьируется.

По результатам расчетов построены графики зависимости коэффициента эффективности оребрения от высоты ребра для разных толщин ребра (рис. 2). По графикам видно, что с увеличением высоты ребра, эффективность оребрения снижается, при этом большим коэффициентом эффективности обладает ребро с большей толщиной ($\delta = 10$ мм).

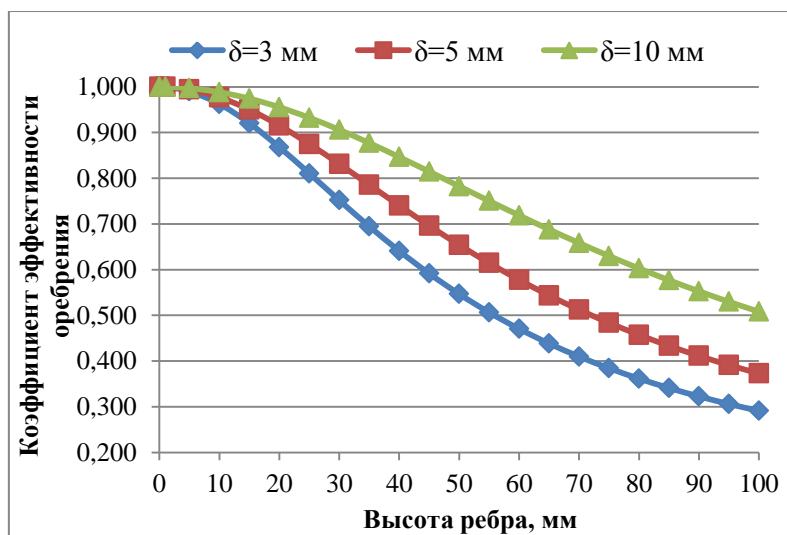


Рис. 2. График зависимости коэффициента эффективности оребрения от высоты ребра

На рис. 3 изображен график зависимости стоимости, теплового потока и удельных затрат от высоты ребра для $\delta = 3$ мм. Можно сделать вывод, что с увеличением высоты ребра идет незначительное удорожание трубного элемента, но при этом интенсивность теплообмена значительно возрастает.

Для определения оптимальной конструкции оребренной биметаллической трубы строятся графики удельных стоимостей (на 1 кВт передаваемой теплоты) для различных толщин ребра (рис. 4).

На основании графиков можно сделать вывод, с увеличением толщины ребра от 3 мм до 10 мм, удельная стоимость снижается нелинейно, поэтому целесообразно выбрать ребро толщиной 10 мм. Что касается высоты ребра, видно, что при высоте до 60 мм удельная стоимость падает достаточно быстро, дальнейшее увеличение ребра дает все меньший положительный эффект. К тому же при увеличении высоты ребра, во-первых, увеличивается сопротивление газового тракта теплообменника, что влечет за собой увеличение затрат на тягодутовое оборудование, во-вторых, увеличение высоты ребра будет увеличивать габариты секций, а как следствие затрат на корпус теплообменника. Таким образом, увеличение высоты ребра выше 60 мм не имеет смысла.

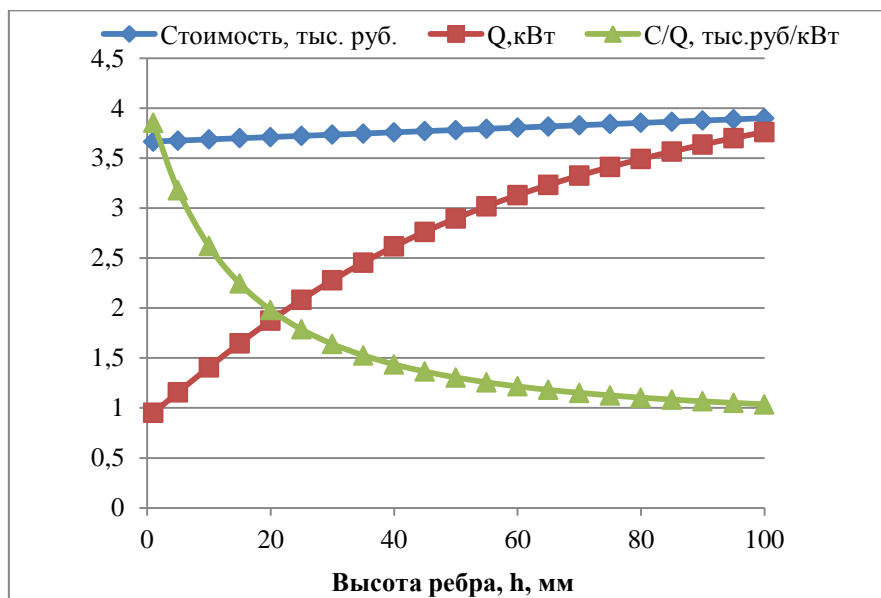


Рис. 3. График зависимости стоимости, теплового потока и удельных затрат от высоты ребра для $\delta=3$ мм

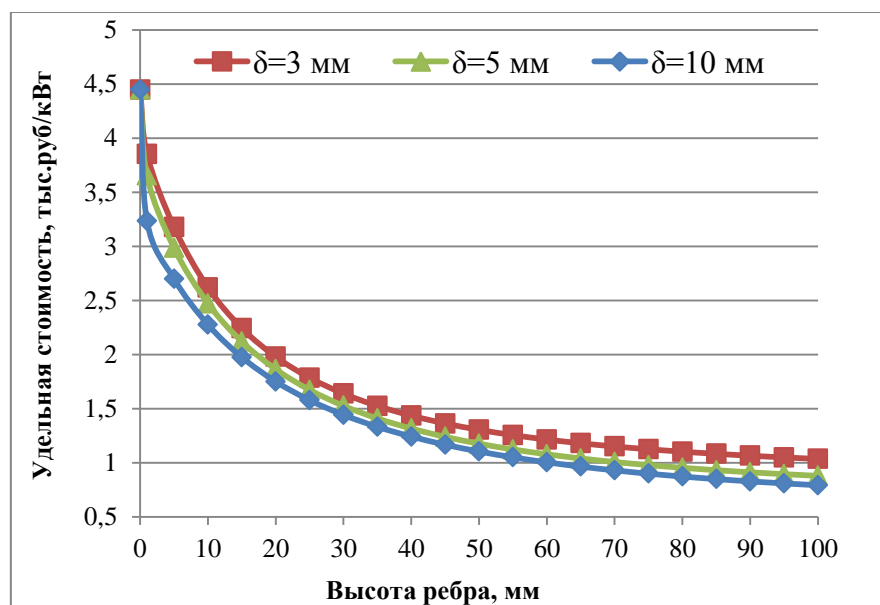


Рис. 4. График зависимости удельной стоимости от высоты ребра

По результатам расчета теплообменного элемента конвективного высокотемпературного нагревателя компримированного воздуха для дальнейшей проработки выбрана конструкция с высотой ребра 60 мм и толщиной – 10 мм.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

Список использованных источников

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов. – изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 255 с.
3. Развитые поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус [и др.]. – М.: Энергия, 1977. – 80 с.
4. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок: Учебное пособие / Т.Г. Гавра, П.М. Михайлов, В.В. Рис [и др.]. – Л.: Ленинградский политехнический институт имени М.И. Калинина, 1982. – 33 с.
5. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

УДК 669.042

И. В. Глухов, Г. В. Воронов, И. В. Плесакин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Аннотация

В работе рассмотрены температурные поля рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 тонн (ДСП–120). Температурные поля были получены с помощью компьютерного моделирования в программе SolidWorks Flow simulation. В работе произведен анализ расположения ТСУ по варианту фирмы «Danieli», а также схемы установки горелок рекомендованной авторами.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, температура, металл, шихта, горелка, фурма, факел, электрод, свод, стена.

Abstract

The paper discusses the temperature field of modern electric arc furnace with a capacity of 120 tons workspace (DSP–120). The temperature field were obtained by computer modeling program SolidWorks Flow simulation. The paper produced TSU location analysis according to an embodiment of the company «Danieli», as well as the installation of burners scheme recommended by the authors.

Keywords: electric arc furnace, temperature, metal, charge, a burner lance, the torch electrode vault wall.

Современная дуговая сталеплавильная печь (ДСП), как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты, получает распространение на вновь вводимых и модернизируемых металлургических заводах. Способ загрузки шихты (в две бадьи на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м³) создают дополнительные трудности в организации теплового, аэродинамического и температурного режимов.

С позиции применения разнотипных энергоносителей современную ДСП следует рассматривать как комплексный тепловой агрегат, в котором используют помимо электрической энергии, природный газ и кислород по способу пламенных сталеплавильных печей, а также